

文章编号:1000-8055(2011)06-1289-06

压气机转子叶片所受激励的相关性

方立成, 李舜酩, 杜建建, 陈茉莉

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了分析复杂流场对叶片的作用,研究了压气机内三种非定常气动激振形式:上游叶片排尾迹、进气畸变和旋转失速的相关性.通过在单级低速轴流压气机试验台上获得的数据,采用自相关和互相关方法,研究三种激励的特性,分析激振信号的相关性机理.结果表明:多次自相关可以清晰地显示出信号的特征频率,有效地抑制干扰噪声;激励信号之间具有很强的相关性,且相关程度主要由偶数阶激励信号产生;两两激励信号之间的互相关频率成分幅值较低,低于各信号的自谱图在该处的幅值;而三个激励信号之间的相关程度较低,其相关性主要存在于偶数阶激励信号的前两阶.

关 键 词: 周期性激振; 进气畸变; 旋转失速; 相关分析; 压气机转子叶片

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Study on the correlative property of excitation on compressor rotor blades

FANG Li-cheng, LI Shun-ming, DU Jian-jian, CHEN Mo-li

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The correlation of the three excitation forms (up-stream blade rows wakes, inlet distortion and rotating stall) was studied to analyze complex flow field of the blade role. The experimental samples were obtained by a single-stage low speed axial compressor test rig. Research focused on analysis of these three types of periodical excitation, employed autocorrelation and cross-correlation approach. Experimental results show that there is high correlation between excitation signals, and the correlation degree rely heavily on even signal. In addition, there is lower amplitude of cross-correlation frequency than amplitude of autocorrelation signal; There is low magnitude correlation among three excitations, correlation mainly exist in the first two of the even degree signal.

Key words: periodical excitation; inlet distortion; rotating stall; correlation analysis; compressor rotor blades

现代航空发动机的结构设计不断向轻量化、高速化发展,发动机的风扇、压气机所受的气动压力明显复杂,影响到其工作可靠性和安全性.特别是压气机叶片在工作时,常常受到进气畸变强迫激励、静子叶片排尾迹流场强迫激励,还受到转子旋转的强迫激励.人们已经对此开展了若干研

究^[1-2],由于研究内容的复杂性,有关的研究大多针对激励形式,如气动激振力,也有研究考虑气流参数沿圆周分布不均匀的流场中旋转造成对叶片的周期性激振力^[3-4].Lecht 等人把动叶表面气动激振力简化为周期性非定常气动力作用到压气机叶片上,进行简化计算^[5].Hall 等人对叶片排的

收稿日期:2010-05-26; 修订日期:2011-01-12

基金项目:国家自然科学基金(50675099)

作者简介:方立成(1980—),男,山东青州人,博士,主要从事航空发动机特征信号提取与分析方面的研究.

尾迹阵风响应进行了研究^[6],建立了响应预测模型.南京航空航天大学对叶片的旋转失速问题进行了若干研究,并在进气畸变对压气机性能的影响方面做了若干工作^[7].北京航空航天大学对压气机在进气畸变条件下的三维非定常数值进行了模拟,并对压气机进口畸变流场对旋转失速特性的影响方面进行了研究^[8].西北工业大学对进气畸变的激励载荷形式进行了研究^[9].

虽然人们前期已经在压气机的气动流场特性方面进行了若干研究,但在分析复杂气动问题时需要考虑各种激励形式对叶片作用的相关性.

基于这个考虑,本文把几种主要的非定常激励形式的相关性来进行统一考虑,探求这些情况下,其激励特征的变化规律.

1 相关分析的基本概念

相关分析是利用统计方法来研究和描述工程中的相关关系,常用的统计量有相关系数、自相关函数和互相关函数等^[10].

若试验产生一组成对的测量数据 (x_i, y_i) , $i=1, 2, 3, \dots, N$,为评定 x 与 y 之间相关程度,常计算 x 与 y 的协方差,具体为

$$\sigma_{xy} = E[(x - u_x)(y - u_y)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - u_x)(y_i - u_y) \quad (1)$$

则相关性的强弱用式(2)表示

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq 1 \quad (2)$$

式中 ρ_{xy} 为相关系数.

信号 $x(t)$ 的自相关函数 $R_x(\tau)$ 是描述一个时刻的取值与前一个时刻值的依赖关系,有

$$R_x(\tau) = E[x(t) * x(t + \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) * x(t + \tau) dt \quad (3)$$

信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互相关函数定义为

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t) * y(t + \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) * y(t + \tau) dt \quad (4)$$

式中“*”表示共轭.

对应的互谱(密度函数)、自谱(密度函数)分别写为

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

式中 $S_{xx}(f)$ 称为 $x(t)$ 的自谱密度函数或自谱.

同理,多个函数 $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ 的互相关函数可由式(7)表示,即

$$x^{(n)}(t, \tau_1, \tau_2) = \int x_1(t) x_2(t + \tau_1) x_3(t + \tau_2) dt \quad (7)$$

2 转子叶片气动激励的主要非定常形式

对压气机叶片而言,主要的非定常激励形式为:上游叶片排尾迹、旋转失速和进气畸变三种非定常激励形式.

1) 尾流激振

在叶轮机内部,叶片尾迹是最根本的周期性扰动源,所产生的周期性扰动,使压气机在工作过程中,各排叶片进、出口及流道内流动参数随时间做周期性的脉动,引起叶片表面非定常气动力的脉动,成为叶片高周疲劳和颤振事故的诱因.

2) 旋转失速

旋转失速只发生在发动机的低转速下(如10%~70%最大转速),由它引起的叶片振动只是短时的,但也能导致叶片断裂.

3) 进气畸变

压气机进气畸变不仅影响发动机性能和稳定性,使压气机产生喘振等,而且非均匀的进气条件将对旋转叶片产生激振力,产生多种复杂的谐波激振成分,引起叶片颤振、强迫振动和共振等并可能导致叶片振动疲劳破坏.

3 转子叶片的主要气动激振力分析

3.1 试验数据获取

本文使用的计算数据由一台单级低速轴流压气机试验台获取.该试验中压气机的转子和静子轮毂比均为0.6,转子前排静子叶片为30个,转子转速为1200 r/min.通过在靠近压气机进口的气动界面(AIP)上布置动态压力测量传感器(LQ-125-5A),对进气畸变和旋转失速的动态压力情况进行测量,并进行数字化记录.

3.2 试验数据分析

3.2.1 试验数据初步处理

首先,对采集到的数据进行处理,得到压力时间历程图和动态压力的频谱图.

图1是压气机均匀进气的情况下用压力传感器测量得到的时间历程图和相应的频谱图.从图中可以看出,压气机均匀进气时,动态压力呈现一定的脉动特性.幅值最大的激振频率为5.62 Hz,

后面的激振频率为幅值最大的激振频率的 2 倍频、3 倍频、4 倍频,幅值都相对较低。

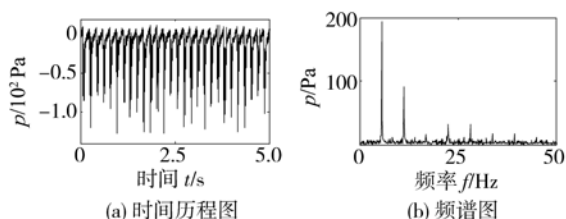


图 1 均匀进气动态压力时间历程图和频谱图

Fig. 1 Time series and spectrum of rotor pulsant pressure force under the full flow

图 2 为进气畸变情况下, AIP 界面上压力传感器测量得到的动态压力的时间历程图和相应的频谱图。图 2(a)为绝对压力的时间脉动图,可见相对压力的波形大致呈现周期性。图 2(b)为绝对压力的频谱图,可以得出进气畸变时,在相当宽的频域上都有幅值出现,但在低频部分有幅值比较大的频率分量。

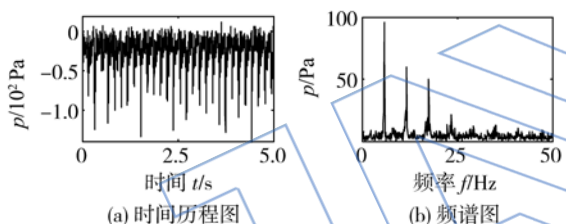


图 2 进气畸变动态压力时间历程图和频谱图

Fig. 2 Time series and spectrum of rotor pulsant pressure force under the inlet distortion

图 3 是压气机旋转失速情况下于 AIP 界面上的压力传感器测量得到的动态压力脉动的时间历程图和相应的频谱图。图 3(a)为旋转失速压力的时间脉动图,绝对压力的波形大致呈现为一系列的反脉冲,即波峰处较平坦,表明速度大时压力也较大,即非失速的宽度较大;波谷较尖,表明速度低的失速团区域较小。图 3(b)为压力值的频谱,可以看出:在转速 1200 r/min 时,在旋转失速的传递频率(即基频 5.8 Hz)及其倍频处出现了较大的扰动信号(图中显示了 2 倍频和 3 倍频),并且随着倍频的增加,信号幅值是衰减的。

尾流激振的试验数据取自转子叶片中径截面的吸力面上,如图 4 所示,尾流激励的压力脉动的时间历程图和压力频谱分析图,分别如图 4(a)和图 4(b)所示。

从图 4(a)可以看出尾流激振力的时间历程

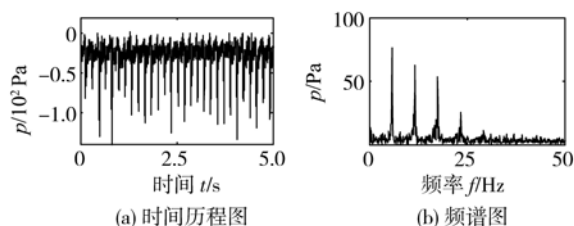


图 3 旋转失速动态压力时间历程图和频谱图

Fig. 3 Time series and spectrum of rotor pulsant pressure force under the rotating stall

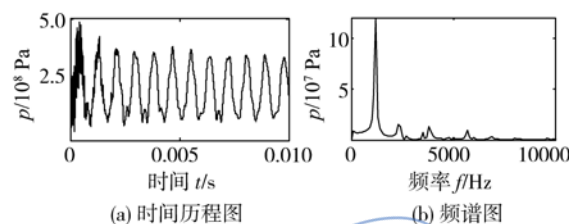


图 4 尾流激振动态压力时间历程图和频谱图

Fig. 4 Time series and spectrum of rotor pulsant pressure force under the trail excitation

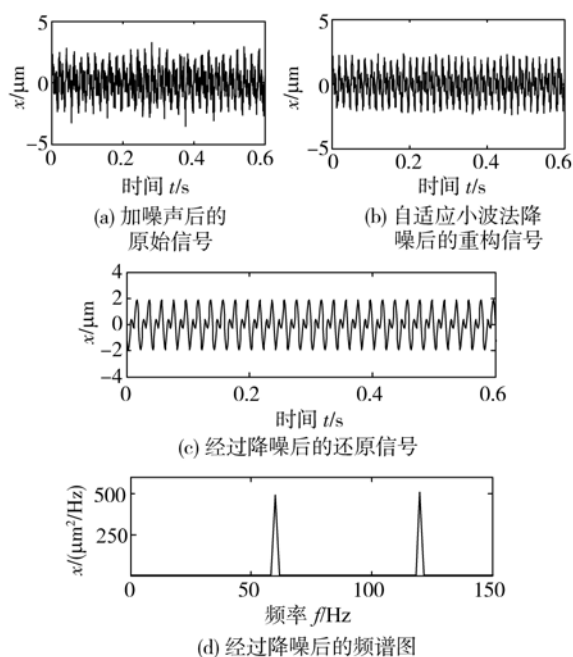
大致呈一个规则的正弦简谐力。对其进行频谱分析,如图 4(b)所示,发现除了 1200 Hz 的基频外,只分别在倍频 2300,3800,5700 Hz 处有 3 阶倍频,且倍频分量相对基频分量很小,并随着倍频增加而逐渐衰弱。

3.2.2 利用相关分析进行降噪处理

降噪滤波是相关分析在信号处理中的一个应用,在强背景噪声下,对信号进行更多次自相关处理,能使微弱的周期性信号很好的表示出来。文献[11]使用了一个仿真算例,利用自适应小波原理,对信噪比为 4.873 : 1 的信号进行了降噪方面的研究,取得了很好的效果,如图 5(b)。本文对同样的信号,利用自相关法进行降噪处理,得到了特征信号降噪后的时序图和频谱图,如图 5(c), (d)所示。

从图 5 中可以看出,自相关降噪法明显地抑制了高斯白噪声。进一步的研究表明,在特征信号的提取中,即使是在特征频率较高、采样点数较少的情况下,这种方法也能清晰明确地显示出信号的特征频率,且信号的重构程度优于小波分析方法,在 4 次自相关后,其信噪比为(SNR)31.3434,优于参考文献[11]的自适应小波方法的 9.5504。

根据第 2 节中自相关函数的定义(式 3),对转子叶片气动激励的原数据进行降噪处理,首先对三种压力信号计算相关系数,然后再进行傅里叶变换,可得各信号的自谱图,如图 6 所示。

图5 $n=3000\text{ r/min}$, $\Delta t=0.0003\text{ s}$ 时仿真信号

自相关降噪后的频谱图和信号还原图

Fig. 5 Frequency spectrum and reverted signal

after self-correlation de-noising in

 $n=3000\text{ r/min}$, $\Delta t=0.0003\text{ s}$

将图 6(a), (b), (c) 三幅自谱图分别与图 1、图 2、图 3 中的 (b) 图进行分析比较, 可以发现自谱图不仅保留了频谱图中的频率分量, 且峰值更尖锐, 干扰噪声的幅值得到了有效抑制, 原先几乎被淹没在噪声中的频率分量能够直观地读出。

图 6 的三幅自相关图中, 均匀进气的自相关系数图随着时间的增加其包络线的幅值基本不变, 且相关系数基本在 0.7 左右, 这说明均匀进气时, 激励的周期成分较强; 而进气畸变和旋转失速的自相关系数图的包络线幅值有较大起伏, 且相关系数较小 (在 0.3 左右), 这说明进气畸变和旋转失速时, 激励的周期成分相对较弱。

3.2.3 对多个激励信号的互相关分析

首先, 根据第 2 节中互相关函数的定义, 按照公式 (4), 计算均匀进气与进气畸变的激励信号互相关函数, 并做出互相关系数图, 同时计算两个激励信号的互谱图, 如图 7 所示。

由图 7 的互相关图, 可得进气畸变时的激励力与均匀进气时的脉动压力之间有较显著的相关性 ($\rho_{xy}=0.43$)。再分析两激励信号的互谱图, 可见在 11 Hz 及其倍频 22 Hz 处幅值较大, 且 33 Hz 和 44 Hz 处也存在频率成分, 说明以 11 Hz 为基频的频率是进气畸变与均匀进气时的激励频率所

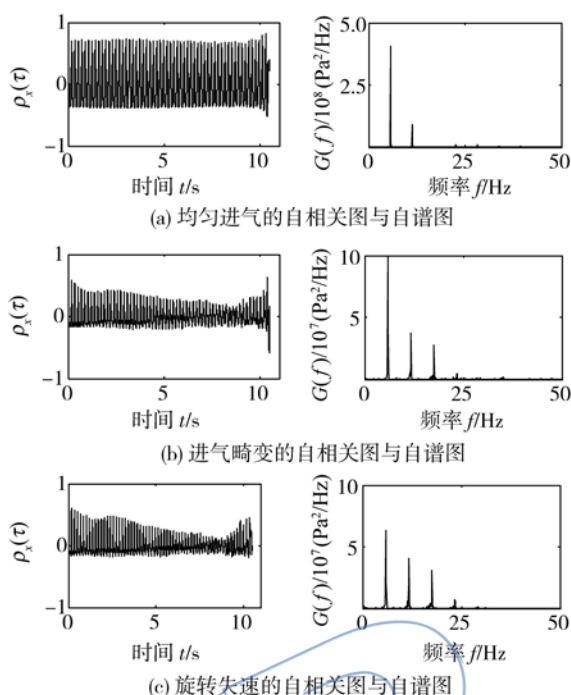


图6 动态压力自相关图与自谱图

Fig. 6 Self-correlation coefficient and self-correlation spectrum of dynamic pressure force

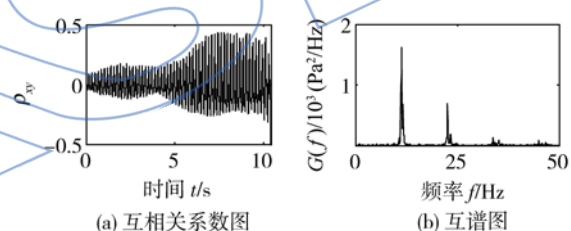


图7 均匀进气与进气畸变互相关图与互谱图

Fig. 7 Cross-correlation coefficient and cross-correlation spectrum between full flow and the inlet distortion

共有的, 再对比图 1(b) 和图 2(b), 发现 11 Hz 的激励频率在两个信号中都存在, 但是均不是幅值最大的, 而幅值最大的激励频率 5.6 Hz 和 5.8 Hz 及其奇数阶倍频在互谱图上却没有出现, 说明在发生进气畸变时, 最低阶频率的激励力发生了改变。对比图 6 中均匀进气与进气畸变的自谱图, 可以发现自谱图中的奇数阶激励频率没有出现, 偶数阶频率的幅值也减小了 5 个数量级 (量纲为 Pa^2/Hz)。

再计算进气畸变与旋转失速的激励信号互相关函数, 并做出互相关系数图, 同时计算进气畸变与旋转失速的激励信号互谱图, 如图 8 所示。

由图 8 的互相关图, 可得进气畸变与旋转失速时的激励力之间显著相关 ($\rho_{xy}=0.63$)。再分析

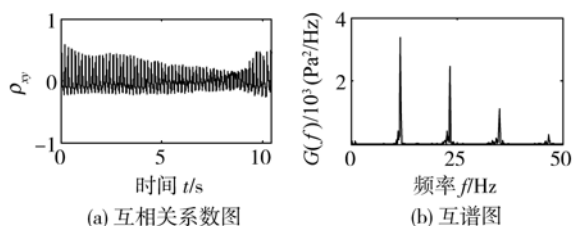


图 8 进气畸变与旋转失速互相关图与互谱图

Fig. 8 Cross-correlation coefficient and cross-correlation spectrum between inlet distortion and the rotating stall

两激励信号的互谱图, 11 Hz 及其倍频 22 Hz 处幅值较大, 而且幅值远超过均匀进气与旋转失速时的互谱图在此位置的幅值, 再对比图 2(b) 和图 3(b), 发现 11 Hz 的激励频率也均存在于两个信号中, 但是均不是幅值最大的, 而幅值最大的激励频率 5.8 Hz 及其奇数阶倍频在互谱图上都没有体现, 说明进气畸变与旋转失速的发生有较密切的关系^[12]. 再对比图 6 中进气畸变与旋转失速的自谱图, 可以发现不仅奇数阶激励频率没有出现, 偶数阶频率的幅值也减小了 4 个数量级 (量纲为 Pa^2/Hz).

计算均匀进气与旋转失速的激励信号互相关函数, 并做出互相关系数图, 同时计算均匀进气与旋转失速的激励信号互谱图, 如图 9 所示.

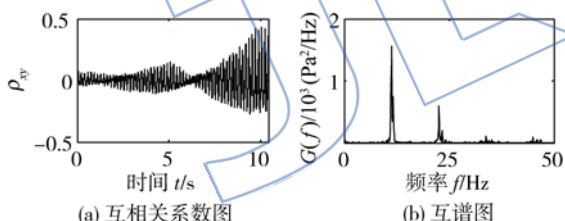


图 9 均匀进气与旋转失速互相关图与互谱图

Fig. 9 Cross-correlation coefficient and cross-correlation spectrum between full flow and the rotating stall

根据图 9 的互相关图, 可得均匀进气与旋转失速时的激励力之间有较显著的相关性 ($\rho_{xy} = 0.42$), 小于进气畸变与旋转失速的互相关系数, 基本上和均匀进气与进气畸变的互相关系数相当. 再分析两激励信号的互谱图, 11 Hz 及其倍频 22 Hz 处幅值较大, 而且幅值小于进气畸变与旋转失速时的互谱图在此位置的幅值, 而大体等于均匀进气与进气畸变时的互谱图在此位置的幅值, 且远远小于图 6 中均匀进气与旋转失速自谱图在该处的幅值.

计算均匀进气、进气畸变和旋转失速三个激励信号的互相关函数, 并做出互相关系数图, 同时计算此三个激励信号互谱图, 如图 10 所示.

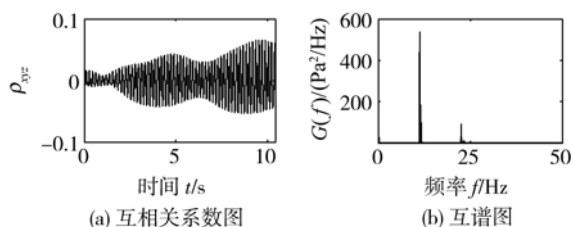


图 10 均匀进气、进气畸变和旋转失速三个激励信号的互相关图与互谱图

Fig. 10 Cross-correlation coefficient and cross-correlation spectrum among full flow, inlet distortion and the rotating stall

由图 10 可以看出三个激励信号的相关系数很小, 属于微相关. 但分析三个激励信号的互谱图时, 可以发现信号只有在 11 Hz 及其倍频 22 Hz 处是有幅值的, 只是远远小于图 6 中三个信号的自谱图在此处的幅值, 而且在更高倍频的 33 Hz 与 44 Hz 处信号均无幅值, 可见激励信号中偶数阶倍频的前两阶 11 Hz 和 22 Hz 是三种激励信号中相关性最显著的, 存在于所有的互相关频谱图中.

从以上分析可以得出, 对于两两激励信号的互相关分析方法, 也可以用在三个激励信号的互相关上, 能够得到较满意的效果.

4 结 论

通过分析压气机叶片主要气动激励力的试验数据, 得出了三种主要激励力之间相关性机理, 主要结论如下:

1) 互相关后的功率谱的谱峰比各激励信号的原始谱峰有明显的降低. 具体表现为两两互相关的幅值减小了 4~5 个数量级, 三个信号的互相关的幅值减小了 5~6 个数量级 (量纲均为 Pa^2/Hz).

2) 对压气机的气动激励信号进行多次自相关处理, 不仅可以检测信号中周期成分, 突显出特征信号, 而且降噪效果明显, 信噪比达 31.3.

3) 进气畸变与旋转失速的相关系数较高, 说明两个激励信号之间具有很强的相关性, 高于均匀进气与进气畸变的相关程度, 且偶数阶倍频是主要的相关激励信号.

4) 三个激励信号的互相关程度低,其互谱图谱峰的幅值不仅远低于原始信号在此处的峰值,也低于两个激励信号互谱图在此处的峰值;激励信号中偶数阶倍频的前两阶仍然是最主要的相关激励频率。

参考文献:

- [1] Hsu S T, Wo A M. Reduction of unsteady blade loading by beneficial use of vortical and potential disturbances in an axial compressor with rotor clocking[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 705-713.
- [2] Durali M, Kerrebrock J L. Stator performance and unsteady loading in transonic compressor stages[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 224-232.
- [3] Weatherill N P, Hassan O. Efficient three-dimensional delaunay triangulation with automatic point creation and imposed boundary constraints [J]. Int. J. of Numerical Methods in Engineering, 1994, 37(2): 2005-2039.
- [4] Caruthers J E, Dalton W N. Unsteady aerodynamic response of a cascade to nonuniform inflow[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1): 76-84.
- [5] Lecht M, Weyer H B. Unsteady rotor blade loading in an axial compressor with steady-state inlet distortion[R]. AGARD Stress, Vibrations, Struct, N79-27176 (AH), 1979.
- [6] Hall K C, Verdon J M. Gust response analysis for cascades operating in nonuniform mean flows[J]. AIAA Journal, 1991, 29(9): 1463-1471.
- [7] 胡骏. 进气畸变对轴流压气机性能影响实验研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 142-146.
HU Jun. Inlet distortion effects in a five-stage compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 142-146. (in Chinese)
- [8] 蒋华兵, 陆亚钧, 袁巍, 等. 进气畸变对低速轴流压气机失速特性的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 355-360.
JIANG Huabing, LU Yajun, YUAN Wei, et al. Influence of inlet distortion on the stall character of a low speed axial compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 355-360. (in Chinese)
- [9] 乔渭阳, 蔡元虎. 畸变进气下压气机叶片非定常载荷的数值模拟[J]. 推进技术, 2001, 22(5): 392-396.
QIAO Weiyang, CAI Yuanhu. Numerical modeling of the unsteady aerodynamic loads in axial flow compressor with inlet distortions [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(5): 392-396. (in Chinese)
- [10] 左泽敏, 李舜酩, 郑娟丽. 相关分析在机械振动信号处理中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2009, 38(1): 75-79.
ZUO Zemin, LI Shunming, ZHENG Juanli. Application of correlation analysis in mechanical vibration signal [J]. Machine Building & Automation, 2009, 38(1): 75-79. (in Chinese)
- [11] 陈果. 基于小波分析的转子故障信号自适应降噪技术研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 9-16.
CHEN Guo. Research on self-adaptive de-noising technique for rotor faults signal based on wavelet analysis [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 9-16. (in Chinese)
- [12] 张靖焱, 林峰, 张宏武, 等. 旋转进口畸变与轴流压气机旋转失速相关联的模型与实验探索[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 279-231.
ZHANG Jingxuan, LIN Feng, ZHANG Hongwu, et al. Experimental and model investigation of the correlation between rotating inlet distortion and rotating stall of an axial comperssor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(2): 279-231. (in Chinese)